

变压器绕组变形测试仪(频响法)校准装置 校准方法的研究

黄 震

(成都三方电气有限公司)

摘要：本文针对变压器绕组变形测试仪(频响法)校准装置的校准需求，提出一套基于行业标准的系统化校准方法。通过分析现有规范的技术要求，明确扫频频率精度($\pm 0.01\%$)、幅值比误差($\pm 0.3\text{dB}$)等核心参数，并设计了覆盖环境条件、设备配置、操作流程的完整校准方案。实验表明，该方法能有效完成变压器绕组变形测试仪(频响法)校准装置的量值溯源，为电力系统变压器的安全运行提供可靠保障。

关键词：变压器绕组变形测试仪；校准方法；幅值比；频率；不确定度

2025.07.dqgy
35

0 引言

变压器绕组变形是导致电力设备故障的关键因素之一，其检测依赖频响法(FRA)测试仪的精度。频响法通过测量绕组在1k~2MHz范围内的传递函数 $H(j\omega)$ ，捕捉由机械形变引起的频域特征偏移(如谐振频点偏移、幅值波动)。然而，现有校准方法仍存在不足：①标准覆盖不全：虽已有DL/T 911—2016等标准规定了频率分辨率($\pm 0.001\%$)和动态范围($-100\sim 20\text{dB}$)，但对信号源线性度、相位一致性的校准缺乏细则；②环境敏感性：测试仪在动态电磁干扰或温湿度波动(如温度超出 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$)时易产生偏差；③多方法协同难题：如频响法与短路阻抗法的混合校准，需兼顾幅值比和阻抗误差百分比，现有流程难以统一。

本文基于相关标准要求，整合参考信号注入、

自动化横向/纵向比对技术，提出一种可溯源的校准框架，旨在解决上述痛点并提升设备互操作性。

变压器绕组变形测试仪(频响法)校准装置在国内的电力行业和各计量检测机构保有量和使用量都很大，制定合理可行的校准方法，并确保实验数据的准确可靠，有利于强化对变压器绕组变形测试仪(频响法)校准装置的质量管理，如图1所示。

1 校准方法

本文通过采用校验仪对变压器绕组变形测试仪(频响法)校准装置进行校准，校验仪测量频率范围为1k~1000kHz，最大允许误差 $\pm 0.01\%$ ；幅值比测量范围为 $(-80\sim +20)\text{dB}$ ；最大允许误差 $\pm 0.3\text{dB}$ 。

校验仪主要由信号检测单元、信号处理单元、信号输出单元，显示及控制等部分组成。工作原理为

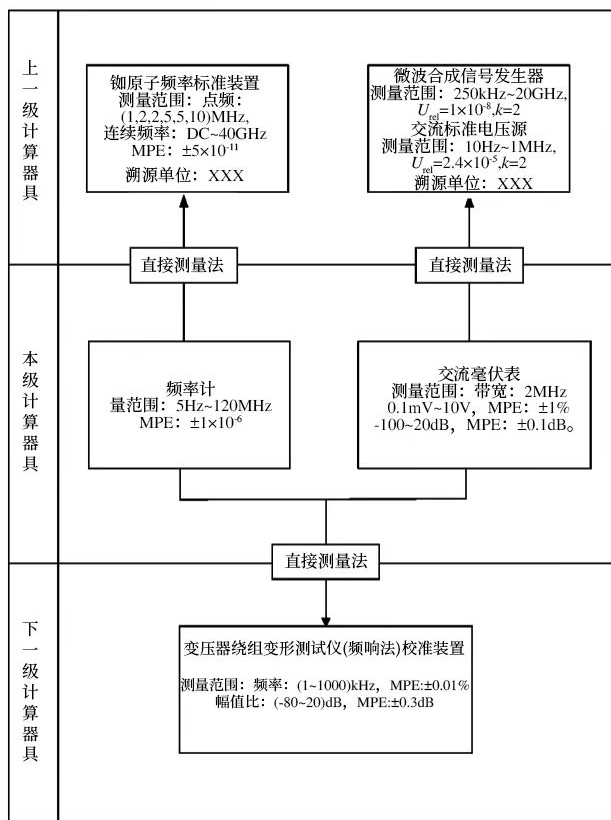


图1 变压器绕组变形测试仪(频响法)校准装置量值传递

通过信号检测单元采集绕组变形测试仪的激励信号电压幅值及电压频率，通过信号处理单元分析采集到的电压信号幅值及电压频率。按照控制单元给出的测量模式及数据，通过信号输出单元（双路输出），输出控制单元要求的标准电压信号给测试仪。最后通过显示单元显示被校绕组变形测试仪的校准结果。原理如图2所示。

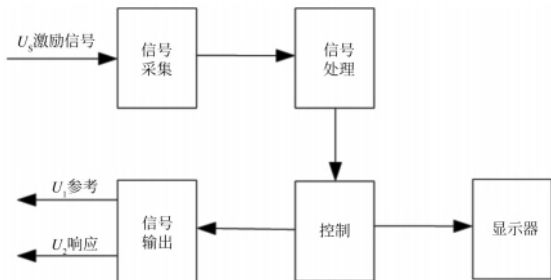


图2 校验仪原理图

本文使用的校准方法的环境条件控制如下：环境温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度 $\leq 80\%$ ；供电电源为 $(220 \pm 22)\text{V}$ ， $(50 \pm 1)\text{Hz}$ 。

用于变压器绕组变形测试仪（频响法）校准装置的校准的其他设备包括：①函数信号发生器：输出电压频率范围应覆盖校验仪频率测量的范围，稳定度不大于 $0.05\%/h$ 。②交流毫伏表：测量范围应覆盖校验仪幅值比测量的范围，最大允许误差的绝对值应不大于校验仪最大允许误差绝对值的 $1/3$ 。③频率计：测量范围应覆盖校验仪频率测量的范围，最大允许误差的绝对值应不大于校验仪最大允许误差绝对值的 $1/3$ 。

2 频率校准

频率测量校准接线如图3所示。

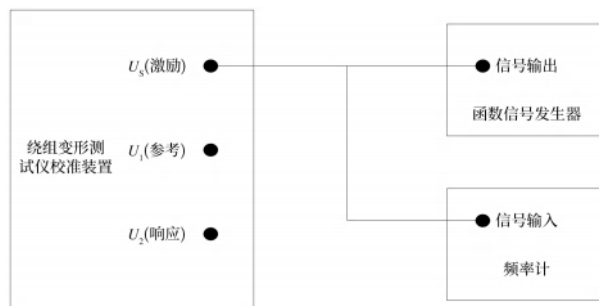


图3 频率测量校准接线图

1) 按图3接线，将频率计和校验仪设置为频率测量功能。

2) 函数信号发生器输出电压波形设置为正弦波，电压有效值为 7V （在不超过校验仪最大允许电压时，此电压应尽可能高），频率分别设置为 1kHz 、 10kHz 、 50kHz 、 100kHz 、 200kHz 、 500kHz 、 1000kHz ，也可以根据实际要求增加校准点。

3) 启动信号发生器输出功能，待信号稳定后，记录校验仪和频率计频率测量显示值。

频率示值误差按式（1）计算：

$$\Delta f = f_x - f_N \quad (1)$$

式中, Δf 为校验仪频率示值误差, kHz; f_x 为校验仪频率测量显示值, kHz; f_N 为频率计频率测量显示值, kHz。

3 幅值比校准

幅值比 (Amplitude Ratio) 以对数形式表示的不同频率下响应端电压 U_2 和激励端电压 U_1 的信号幅值之比, 用于表征幅频响应曲线 $H(f)$:

$$H(f) = 20 \lg \frac{U_2(f)}{U_1(f)} \quad (2)$$

式中, $H(f)$ 为传递频率为 f 时传递函数的模 $|H(j\omega)|$, dB; $U_2(f)$ 为传递频率为 f 时响应端电压的峰值或有效值 $|U_2(j\omega)|$, V; $U_1(f)$ 为传递频率为 f 时激励端电压的峰值或有效值 $|U_1(j\omega)|$, V。

幅值比测量校准接线如图 4 所示。

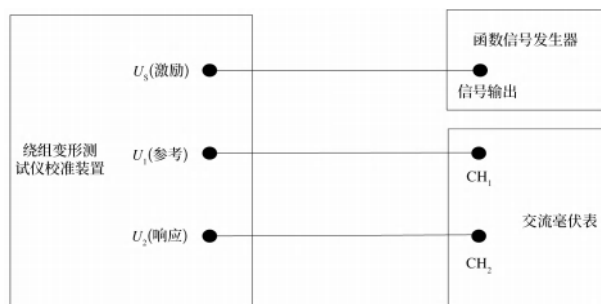


图 4 幅值比测量校准接线图

1) 按图 4 接线, 将交流毫伏表和校验仪设置为幅值比测量功能。

2) 校验仪幅值比分别设置为 +20dB、0dB、-10dB、-20dB、-40dB、-60dB、-80dB, 也可以根据实际要求增加校准点。

3) 函数信号发生器输出电压波形设置为正弦波, 电压有效值为 7V (在不超过校验仪最大允许电压时, 此电压应尽可能高), 频率分别设置为 1kHz、10kHz、50kHz、100kHz、200kHz、500kHz、

1000kHz, 也可以根据实际要求增加校准点。

4) 启动函数信号发生器输出功能, 待信号稳定后, 记录交流毫伏表和校验仪幅值比显示值。

幅值比误差按式 (3) 计算:

$$\Delta H(f) = H(f)_x - H(f)_N \quad (3)$$

式中, $\Delta H(f)$ 为校验仪幅值比误差, dB; $H(f)_x$ 为校验仪幅值比设定值, dB; $H(f)_N$ 为幅值比测量实际值, dB。

4 校准数据

对变压器绕组变形测试仪校验装置的校准方法进行验证, 使用型号为 HV-RZBX 的校验仪, 校准结果满足校准需求。

校验仪 (型号: HV-RZBX) 幅值比校准结果显示所有校准点误差均满足技术要求 ($\pm 0.3\text{dB}$), 如图 5 所示。最大误差为 0.15dB (1000kHz/-80dB), 最小误差为 0.001dB (1000kHz/-60dB)。高频段 ($\geq 100\text{kHz}$) 误差略高于低频段, 但仍在允许范围内 (例如 100kHz/-40dB 误差为 -0.14dB, 1000kHz/-10dB 误差为 -0.1202dB)。

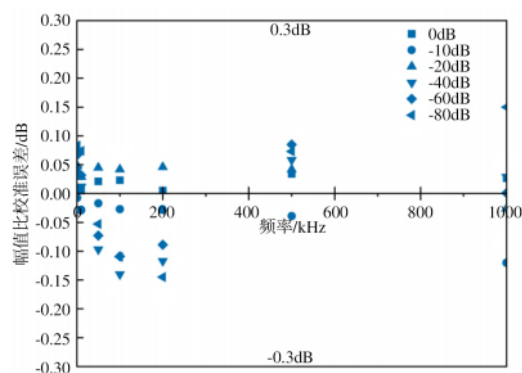


图 5 校验仪 (型号: HV-RZBX) 幅值比测量校准误差分析

频率校准结果显示所有频率点误差均优于技术要求 ($\pm 0.01\%$), 实际误差范围为 $0 \sim 5.0 \times 10^{-5}$ (即 0.005%), 精度远超标准要求。

同样，对变压器绕组变形测试仪校验装置（型号：FRAT-1）进行验证，新增校验仪幅值比为+20dB的校准点，校准结果满足校准需求。

校验仪（型号：FRAT-1）所有校准点误差均符合技术要求（ $\pm 0.3\text{dB}$ ），如图6所示。最大误差为-0.088dB（200kHz/-80dB），最小误差为-0.009dB（500kHz/-80dB）。高频段（ $\geq 200\text{kHz}$ ）误差略高于低频段，但均在允许范围内（例如500kHz/+20dB误差为-0.077dB，1000kHz/-80dB误差为-0.032dB）。1k~100kHz频率段的误差范围为-0.082dB（50kHz/-80dB）~+0.092dB（100kHz/-40dB），整体稳定性良好。极端幅值（-80dB）时，高频段误差普遍接近负限值（如50kHz/-80dB误差-0.082dB、200kHz/-80dB误差-0.088dB）。正幅值（+20dB）中所有频率段误差均较小（如1000kHz/+20dB误差-0.036dB），表明高幅值信号稳定性优异。

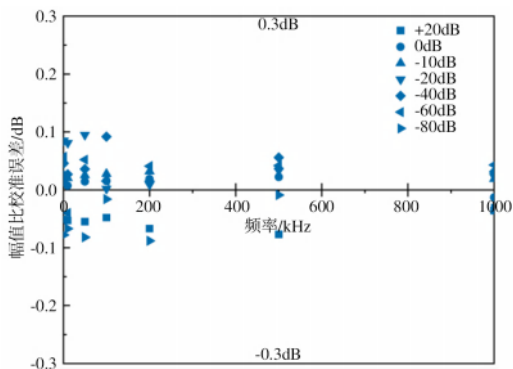


图6 校验仪（型号：FRAT-1）幅值比测量校准误差分析

校验仪（型号：FRAT-1）频率校准结果显示所有频率点误差均远优于技术要求（ $\pm 0.01\%$ ），实际误差范围为 -4.5×10^{-5} （200kHz）~ -1.8×10^{-6} （1000kHz），精度显著超出标准。

5 不确定度分析

5.1 频率测量不确定度评定

以100kHz频率为例，根据方法进行校准。频率测量不确定度的主要来源包括：①测量重复性引入的标准不确定度 u_1 ；②标准装置的分辨力引入的标准不确定度 u_2 ；③标准装置的准确度引入的标准不确定度 u_3 。频率测量不确定分量汇总表如表1所示。各输入量测量不确定度之间不相关，合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (4)$$

表1 频率测量不确定分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布类型	标准不确定度 u
u_1	重复性	A	正态	0.00005kHz
u_2	标准装置分辨力	B	均匀	$3 \times 10^{-9}\text{kHz}$
u_3	标准装置最大允许误差	B	均匀	0.000058kHz

频率测量重复性数据见表2。

表2 100kHz点测量重复性数据

测量次数	实际值/kHz
第1次	99.9998
第2次	99.9998
第3次	99.9999
第4次	99.9999
第5次	99.9998
第6次	99.9999
第7次	99.9998
第8次	99.9999
第9次	99.9998
第10次	99.9999

频率的测量重复性不确定度由实验标准差来表示，根据表2中的数据，频率连续测量10次的实验标准偏差为：

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(f_{xi} - \bar{f}_x)^2}{n-1}} = 0.00005\text{kHz} \quad (5)$$

由测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_1 = s = 0.00005\text{kHz} \quad (6)$$

频率计分辨力为 $1 \times 10^{-8}\text{kHz}$ ，均匀分布，包含因

子 $k=\sqrt{3}$ ，则标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{1 \times 10^{-8} \text{ kHz}}{2\sqrt{3}} = 3 \times 10^{-9} \text{ kHz} \tag{7}$$

频率计频率最大允许误差为 $\pm 1 \times 10^{-6}$ ，均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则 100kHz 点标准不确定度为：

$$u_3 = \frac{1 \times 10^{-6} \text{ kHz}}{\sqrt{3}} \times 100 = 0.000058 \text{ kHz} \tag{8}$$

根据表 1 的不确定度分量表，其合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.000076 \text{ kHz} \tag{9}$$

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$\begin{aligned} U &= ku_c = 2 \times 0.000076 \text{ kHz} \\ &= 1.5 \times 10^{-4} \text{ kHz} \end{aligned} \tag{10}$$

相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = 1.5 \times 10^{-6}, k=2 \tag{11}$$

5.2 幅值比测量不确定度评定

以 1kHz 频率下 -20dB 幅值比为例，使用校验仪进行校准。

幅值比测量不确定度的主要来源包括：①测量重复性引入的标准不确定度 u_1 ；②标准装置的分辨力引入的标准不确定度 u_2 ；③标准装置的准确度引入的标准不确定度 u_3 。幅值比测量不确定度分量汇总表如表 3 所示。各输入量测量不确定度之间不相关，合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \tag{12}$$

表 3 幅值比测量不确定度分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布类型	标准不确定度 u
u_1	重复性	A	正态	0.0018dB
u_2	标准装置分辨力	B	均匀	0.00029dB
u_3	标准装置最大允许误差	B	均匀	0.058dB

幅值比测量重复性数据见表 4。

表 4 -20dB 点测量重复性数据

测量次数	实际值/ dB
第 1 次	-20.048
第 2 次	-20.043
第 3 次	-20.045
第 4 次	-20.043
第 5 次	-20.045
第 6 次	-20.046
第 7 次	-20.048
第 8 次	-20.043
第 9 次	-20.045
第 10 次	-20.045

幅值比的测量重复性不确定度由实验标准差来表示，根据表 4 中的数据，幅值比连续测量 10 次的实验标准偏差为：

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(H(f)_{xi} - \overline{H(f)_x})^2}{n-1}} = 0.0018 \text{ dB} \tag{13}$$

重复性引入的标准不确定度分量为：

$$u_1 = s = 0.0018 \text{ dB} \tag{14}$$

交流毫伏表幅值比分辨力为 0.001dB，均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{0.001 \text{ dB}}{2\sqrt{3}} = 0.00029 \text{ dB} \tag{15}$$

交流毫伏表最大允许误差 $\pm 0.1 \text{ dB}$ ，均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则 -20dB 点标准不确定度为：

$$u_3 = \frac{0.1 \text{ dB}}{\sqrt{3}} = 0.058 \text{ dB} \tag{16}$$

根据表 3 的不确定度分量表，其合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.058 \text{ dB} \tag{17}$$

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.058 \text{ dB} = 0.12 \text{ dB} \tag{18}$$

6 结束语

本文提出的校准方法实现了对频响法测试仪的全参数覆盖校准。实验表明，用此方法校准结果，设备
(下转第 95 页)